



Zbigniew CIOK

Politechnika Warszawska

Gazy zastępcze do SF₆ – mieszaniny gazowe

Streszczenie. Wobec konieczności ograniczenia stosowania sześćsiofluorku siarki (SF₆) z uwagi na jego szkodliwe oddziaływanie na środowisko, w referacie omówiono gazy i mieszaniny gazowe zastępcze dla sześćsiofluorku siarki w zastosowaniu do układów izolacyjnych oraz do gaszenia łuku elektrycznego.

Abstract. (Gas substitutes of SF₆ – gaseous mixtures) Due of harmful sulfur hexafluoride SF₆ affecting on environment and limitation of its using in electrical equipment as insulating and arc quenching medium, in the paper the substitute gases and gas mixtures are described.

Słowa kluczowe: sześćsiofluorek siarki (SF₆), gazy izolacyjne, gazy do gaszenia łuku, mieszaniny gazowe.

Keywords: sulfur hexafluoride, insulating gases, arc quenching gases, gaseous mixtures.

Wstęp

Sześćsiofluorek siarki (SF₆) jest obok powietrza atmosferycznego, preferowanym gazem w urządzeniach elektroenergetycznych jako czynnik izolacyjny, oraz medium używane do gaszenia łuku elektrycznego, w obu przypadkach zwłaszcza przy wysokich napięciach. Własności fizyczne, w tym elektryczne, oraz chemiczne, czystego SF₆ omawiane są w literaturze specjalistycznej, w tym np. [1].

W ostatnich latach stwierdzono jednakże niekorzystny wpływ tego gazu na tzw. efekt cieplarniany, oraz na ozon atmosferyczny, co było powodem włączenia SF₆ na konferencji w Kyoto na listę gazów limitowanych, a co zatem, wprowadzono ograniczenia w jego stosowaniu. W tej sytuacji podjęto prace dotyczące ograniczenia stosowania gazu SF₆ również w urządzeniach elektroenergetycznych przez zastosowanie mieszanin gazowych i ewentualnych gazów zastępczych, co jest zasadniczą treścią niniejszego referatu.

Oddziaływanie SF₆ na środowisko

Sześćsiofluorek siarki jest gazem wdrożonym do urządzeń elektrycznych w ostatnim 30-leciu z uwagi na jego doskonałe własności izolacyjne i chłodzące; jest to jednocześnie gaz niepalny, obojętny chemicznie i nie wykazuje negatywnych oddziaływań biologicznych. Należy jednak stwierdzić że pewne związki siarki z fluorem powstające w niewielkich ilościach podczas wyładowań elektrycznych mogą być toksyczne jak również mogą być aktywne chemicznie. Do trwałych gazowych produktów rozkładu, które mogą się pojawić w urządzeniach z SF₆ należy zaliczyć CF₄, SOF₂, SOF₄, SO₂F₂, a ponadto wykrywany ostatnio S₂F₁₀, który wykazuje szczególnie toksyczne działanie, w tym i na organizm ludzki [2].

Długotrwały kontakt z otaczającą urządzenia elektryczne atmosferą powoduje, że część z wyżej wymienionych związków o dużej aktywności chemicznej w połączeniu z wilgocią zawartą w atmosferze tworzy związki o charakterze kwasów w powiązaniu z SO₂ oraz HF.

Sześćsiofluorek siarki należy do związków chemicznych, które nie występują w warunkach naturalnych.. Aktualnie, zgodnie z oceną Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatycznych (IPCC) oraz Agencji Ochrony Środowiska w USA (EPA) SF₆ został uznany jako gaz szczególnie czynny w tworzeniu efektu cieplarnianego. Jego globalny „potencjał cieplny”, to jest intensywność pochłaniania promieniowania podczerwonego, jest 25.000 razy większa od pochłaniania tego zakresu widma przez CO₂. Odpowiednie dane

porównawcze różnych związków chemicznych w stosunku do CO₂ podano w tabeli 1.

Tabela 1. Globalny potencjał chemiczny ważniejszych związków chemicznych w odniesieniu do CO₂

Rodzaj gazu	Czas życia [lata]	Glob. poten. cieplny	Główne źródła i zastosowanie
CO ₂	50 -200	1	spalanie węgla kamiennego
CF ₄	50 000	6300	wytop aluminium, produkcja półprzewodników
C ₂ F ₆	10 000	12 500	wytop aluminium, produkcja półprzewodników
SF ₆	3 200	24 000	izolacja elektryczna (80%), odlewanie aluminium, oraz produkcja półprzewodników

Mając na uwadze wnioski wynikające z danych zawartych w tabeli 1 o wpływie SF₆ na efekt cieplarniany istotne znaczenie posiada obserwowany ostatnio w ramach badań środowiskowych wzrost koncentracji SF₆ w atmosferze [3]. Stwierdza się, że w ostatnim dziesięcioleciu poziom ten zmienia się średnio o 8,7 % rocznie. Z ilości śladowych w 1970 roku, kiedy koncentracja tego gazu była na granicy wykrywalności, w latach 80-tych kształtowała się na poziomie 3,2 ppt (tj 10¹² części objętościowo), w ostatnim 10-leciu uległa już dwukrotnemu zwiększeniu [3].

Głównymi przyczynami emisji SF₆ z zamkniętych urządzeń elektrycznych są ich nieszczelności oraz ubytki gazu w czasie zabiegów konserwacyjnych, napraw i awarii. Zgodnie z aktualną normalizacją dopuszczalne ubytki gazu z urządzeń elektroenergetycznych wynoszą 1 % rocznie. Stwierdzono jednak w eksploatacji, że ubytki te mogą być znacznie większe. Dlatego też podejmowane są w ostatnich latach intensywne działania zmierzające do ograniczenia emisji SF₆ do atmosfery przez:

- poprawę szczelności urządzeń elektroenergetycznych,
- ograniczenie ich remontów i przeglądów,
- ponowne zagospodarowanie SF₆ po jego wymianie (recykling),
- zmniejszenie ilości użytego w konstrukcji SF₆ przez mieszanie go z innym, obojętnym gazem np azotem, oraz,
- dobór nowych mieszanin gazowych obojętnych dla środowiska.

Oddziaływanie sześciofluorku siarki na życie biologiczne

W warunkach pracy z urządzeniami wypełnionymi SF₆, a zwłaszcza ich przeglądów i remontów personel obsługi i w mniejszym stopniu mieszkańcy z otoczenia, mogą być narażeni na działania gazowych i stałych produktów rozkładu SF₆. Podstawowe zagrożenie stwarzają tu związki trwałe. Przyjęte za obowiązujące wartości dopuszczalne koncentracji poszczególnych związków gazowych z punktu widzenia ich oddziaływania toksycznego, opracowane dla potrzeb produkcji ciągłej należy traktować jako wskazówki, które powinny być stosowane przez służby ochrony zawodowej. W normalnych warunkach pracy urządzeń przy występujących śladowych przeciekach gazu koncentracje produktów jego rozkładu są znacznie niższe od przyjętych jako granicznie dopuszczalne.

Większość składników stałych produktów rozkładu występujących w formie proszków to fluorki aluminium i miedzi jak AlF₃ i CuF₂ oraz ich związki uwodnione, oraz związki z tlenkami wolframu (WO₃). Z uwagi na bardzo małe wymiary tych cząstek (<2μm) mogą się one unosić w powietrzu atmosferycznym przez dłuższy czas. Jednocześnie proszki te w wyniku reakcji chemicznych z parą wodną tworzą związki chemiczne o charakterze kwasowym, z którymi należy postępować w sposób szczególnie ostrożny [3].

Mieszanki gazowe dla potrzeb urządzeń elektroenergetycznych

Stwierdzony wpływ SF₆ na efekt cieplarniany oraz rozkład ozonu O₃ w atmosferze ziemskiej był powodem włączenia tego gazu na konferencji w Kyoto do gazów limitowanych. Również fakt skraplania się tego gazu przy niskich temperaturach był powodem podjęcia badań nad gazami zastępczymi do SF₆ lub nad mieszaninami z innymi gazami [4].

Gazy i mieszanki gazowe możliwe do stosowania jako medium izolacyjne i do gaszenia łuku elektrycznego brane obecnie pod uwagę, a również przewidywane do dalszych badań w najbliższej przyszłości zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Gazy i mieszanki gazowe możliwe do stosowania jako medium izolacyjne i do gaszenia łuku

Wyszczególnienie	Izolacja	Gaszenie łuku
Stosowane obecnie gazy i mieszanki gazowe	40%SF ₆ +60%N ₂ 50%SF ₆ +50% N ₂	40%SF ₆ +60%N ₂ ; 50%SF ₆ +50%N ₂
Prowadzone obecnie badania	czysty azot (N ₂) pod wysokim ciśnieniem, mała koncentracja SF ₆ , oraz czysty azot	SF ₆ +He
Przewidywane kierunki badań	CO ₂ SO ₂ N ₂ O N ₂ +SO ₂ N ₂ +c-C ₄ F ₈ SO ₂ +SF ₆ SO ₂ +c-C ₄ F ₈ +SF ₆ +CO ₂	SF ₆ +Ar SF ₆ +CF ₄ SF ₆ +C ₂ F ₆ SF ₆ +N ₂ +He SF ₆ +N ₂ +Ar+He+gazy elektroujemne

Przewidywane kierunki badań mieszanin gazowych dotyczą:

- wpływu wilgoci i zanieczyszczeń na wytrzymałość dielektryczną,
- rozkładu mieszanin gazowych, w tym w szczególności SF₆+N₂, w zależności od koncentracji cząstek, zawartości zanieczyszczeń i od rodzaju wyładowania elektrycznego,

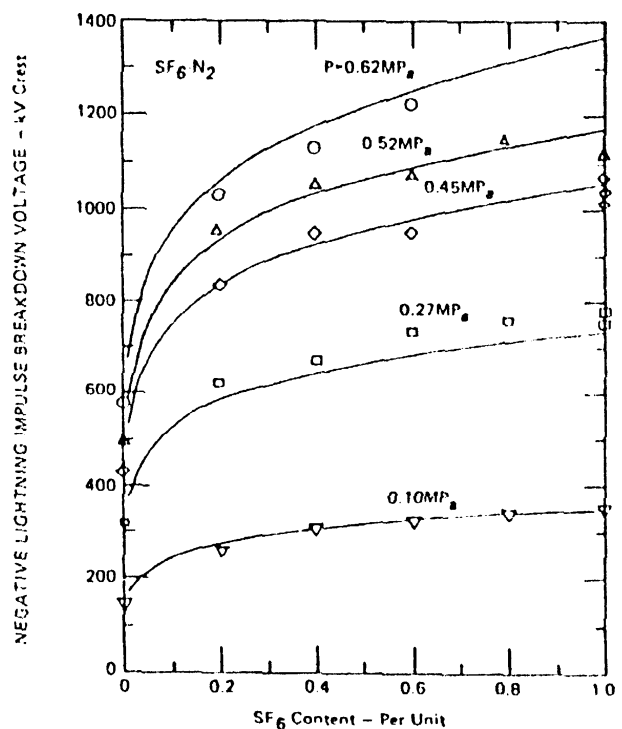
- zależności wytrzymałości dielektrycznej od ciśnienia gazu,
- zmiany parametrów gazu w czasie długotrwałej eksploatacji,
- redukcji kosztów odzysku SF₆ ze zużytych mieszanin gazowych,

Mieszanki gazowe dla potrzeb izolacji

Mieszanki gazowe w układach izolacyjnych z SF₆ dotyczą rozdzielnic gazowych (GIS), gazowych linii przesyłowych (GIL), a również przekładników i transformatorów.

Przykładowo mieszanina 50%SF₆+50%N₂ stosowana w rozdzielnicach gazowych pracujących przy temperaturach poniżej 30°C, przy 15% wzroście ciśnienia ma tę samą wytrzymałość dielektryczną, co czyste SF₆, przy 35% niższym koszcie.

Wytrzymałość dielektryczna mieszaniny gazowej SF₆-N₂ zależy od jej procentowego składu, ciśnienia i rodzaju napięcia probierczego. Na rys. 1 pokazano przykładowo taką zależność dla napięcia udarowego dla współosiowego układu elektrod cylindrycznych charakteryzującego się jednorodnym polem elektrycznym [5].

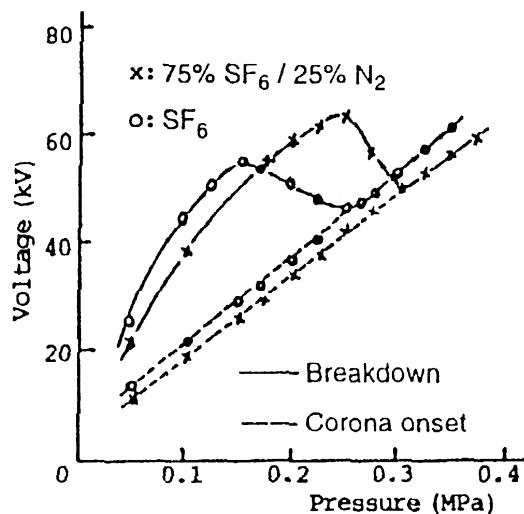


Rys. 1. Wytrzymałość elektryczna koaksjalnego układu izolacyjnego dla mieszaniny gazowej SF₆-N₂ przy różnych ciśnieniach i ujemnych udarach napięciowych [5].

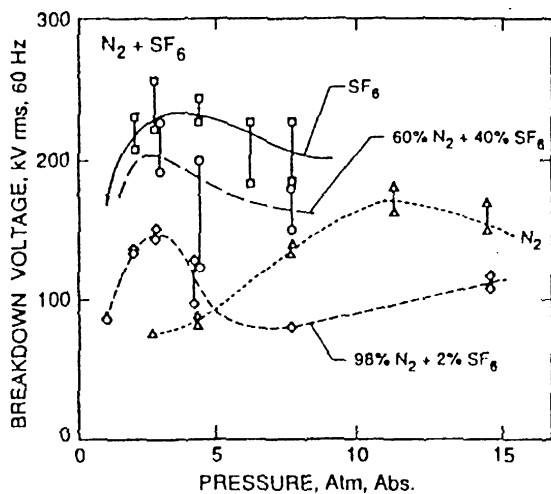
Przy niejednorodnym polu elektrycznym, (np. w układzie ostrze-płyta) charakterystyki wytrzymałościowe, w zależności od ciśnienia, zmieniają istotnie swój kształt, co pokazano na rysunku 2 [6]. Występuje tu również wyładowanie ulotowe, co zaznaczono na ostatnim rysunku. Na kolejnym rysunku (rys.3) przedstawiono wpływ ostrzy igłowych (modelujące zanieczyszczenia przewodzące) na napięcie przebicia przy napięciu przemienicznym.

Z analizy wyników podanych wyżej badań można stwierdzić, że wytrzymałość na przebicie zależy w większym stopniu od wartości ciśnienia mieszaniny gazowej niż od jej procentowego składu.

Na rysunku 4 podano wyniki badań mieszanin gazowych o małej zawartości SF₆. Z analizy przedstawionych danych wynika, że przy małej koncentracji SF₆ w mieszaninie gazowej z azotem, oraz przy niskich ciśnieniach, wytrzymałość dielektryczna mieszaniny jest nieznacznie mniejsza od wytrzymałości czystego SF₆, co można skompensować niewielkim zwiększeniem ciśnienia.



Rys. 2. Przykładowa zależność napięcia przebicia i początkowego napięcia ulotowego przy ujemnych udarach napięciowych dla koaksjalnego układu izolacyjnego dla mieszaniny gazowej 75%SF₆ oraz 25%N₂ przy różnych ciśnieniach. [6].



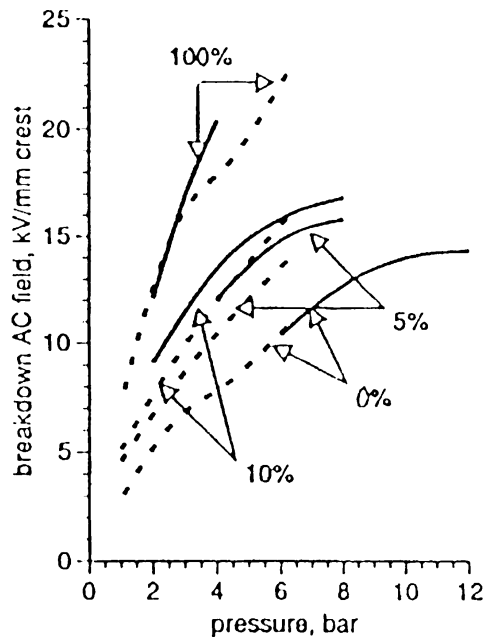
Rys. 3. Wolnozmiennne napięcie przebicia mieszanin gazowych SF₆-N₂ w funkcji ciśnienia, w układzie ostrze- płyta przy odległości międzyelektrodowej równej 7,6 cm z obecnością igły na elektrodzie płaskiej o długości 0,43 mm oraz 6,35 mm [7,8,9].

W opracowaniu nie podano wytrzymałości dielektrycznej innych gazów jak np. hel, argon, czy związków chemicznych jak np. CO, CO₂ i innych, zwłaszcza związków z fluorem, ale ogólnie można stwierdzić, że ich wytrzymałość dielektryczna jest istotnie mniejsza niż SF₆.

W podsumowaniu własności izolacyjnych innych gazów niż SF₆, oraz mieszanin gazowych można stwierdzić, że:

- nie są obecnie znane gazy o własnościach izolacyjnych lepszych lub zbliżonych do SF₆,
- w układach izolacyjnych z jednorodnym polem elektrycznym pracujących przy niskich temperaturach (<-30°C) korzystne jest stosowanie mieszanin gazowych z azotem (N₂), lub czterofluorkiem węgla (CF₄), kiedy

- spadek wytrzymałości można skompensować niewielkim wzrostem ciśnienia, oraz
- przy niskich ciśnieniach, do kilku barów, mogą być stosowane mieszaniny gazowe z azotem, przy obecności objętościowej SF₆ do 15%.



Rys. 4. Gradient wytrzymałości dielektrycznej przy napięciu przemiennym dla mieszanin gazowych SF₆-N₂ i czystych gazów, w funkcji ciśnienia [4, 6].

Mieszaniny gazowe dla układów gaszenia łuku

Wykorzystanie mieszanin gazowych z SF₆ w układach gaszenia łuku dotyczy rozdzielnic i wyłączników wolnostojących, które pracują w niskich temperaturach, kiedy SF₆ może przechodzić ze stanu gazowego w stan płynny, a nawet przy temperaturach poniżej ok. -51°C w stan stały. W tych warunkach ma miejsce zmniejszenie gęstości gazu, a co zatem i jego wytrzymałości elektrycznej oraz zdolności gaszenia łuku. Ten niedostatek może być ograniczony przez stosowanie podgrzewania, z czym wiąże się jednak utrudnienia konstrukcyjne, a jednocześnie i większa zawodność eksploatacyjna.

Alternatywnym rozwiązaniem do podgrzewania może być zastosowanie mieszanin gazowych, przy czym dodatkowy gaz musi mieć niższą temperaturę skraplania niż SF₆. Do gazów, które obecnie znalazły praktyczne zastosowanie można zaliczyć azot (N₂) oraz czterofluorek węgla (CF₄). Należy mieć jednak na uwadze, że wytrzymałość elektryczna każdego z tych gazów jest 2,3 do 2,5-razy mniejsza niż czystego SF₆. Mieszanina tych gazów np. z azotem daje dzięki synergetycznemu działaniu stosunkowo wysoką wytrzymałość dielektryczną, przykładowo dla 40%SF₆ i 60%N₂ wynosi ona ok. 85% wytrzymałości czystego SF₆.

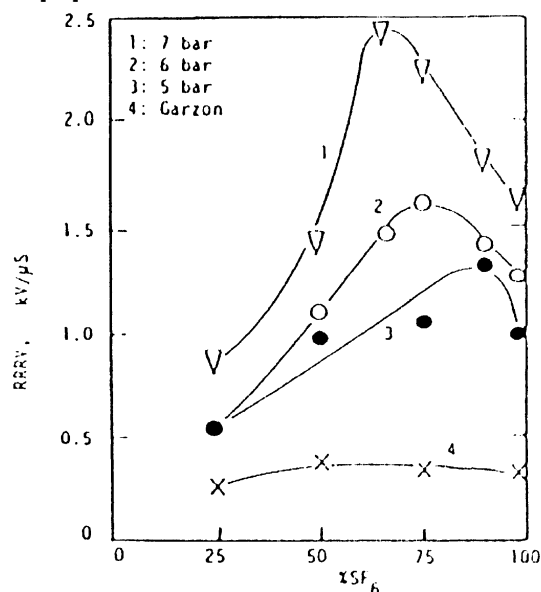
Jednocześnie należy stwierdzić, że mieszanina SF₆-N₂ wykazuje mniejszą czułość na powierzchniowe zanieczyszczenia cząstkami przewodzącymi w stosunku do czystego SF₆ [9].

Jedną z pierwszych publikacji dotyczących badań mieszanin gazowych dla potrzeb gaszenia łuku elektrycznego były prace Granta [10], oraz Garzona [11], w których przedstawiono wyniki badań wyłączania prądu przy różnych stromościach napięcia powrotnego (RRRV) w mieszaninie gazowej SF₆+N₂ przy różnych ciśnieniach

i różnym stosunku objętościowym obu gazów. Wyniki te przedstawiono na rys. 5 i w tabeli 3.

Z danych tych wynika, że mieszaniny gazowe przy większej od 50% zawartości SF₆ mogą mieć nawet korzystniejszą wytrzymałość (odporność) na stromość napięcia powrotnego. Jednakże mając na uwadze, że mieszanina SF₆+N₂ jest stosowane dla obniżenia temperatury skraplania SF₆, kiedy udział obu gazów jest co najmniej równy, zdolność wyłączeniowa jest już obniżona nawet o kilkadziesiąt procent.

Wyniki badań zdolności wyłączeniowej układu gaszeniowego z uwzględnieniem wpływu prądu wyłączeniowego przy wyłączaniu tzw. zwarć bliskich (za krótkim odcinkiem linii dołączonym do zacisków łącznika) dla różnych mieszanin gazowych, w tym i z helem, podano w tabeli 5 [14].



Rys 5. Zależność stromości napięcia powrotnego (RRRV) dla mieszanin gazowych SF₆-N₂ [10, 11]

Tabela 3. Stosunek wytrzymywanego RRRV dla danej mieszaniny gazowej w odniesieniu do czystego SF₆.

%SF ₆	Azot (N ₂)				Hel (He)	Powietrze
	500 kPa	600 kPa	700 kPa	1700 kPa	600 kPa	1700 kPa
100	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
90	1,32	1,07	1,13	1,02	1,12	-
75	1,03	1,24	1,46	1,08	-	-
65	-	-	1,52	1,17	-	-
60	-	0,93	-	1,22	1,13	-
50	1,0	0,82	0,86	1,14	1,14	0,52
40	-	-	-	1,39	-	-
25	0,56	0,38	0,52	0,90	1,08	0,28

Tabela 4. Pomierzone zdolności wyłączeniowe gazów i mieszanin gazowych przy ciśnieniu 0,6 MPa

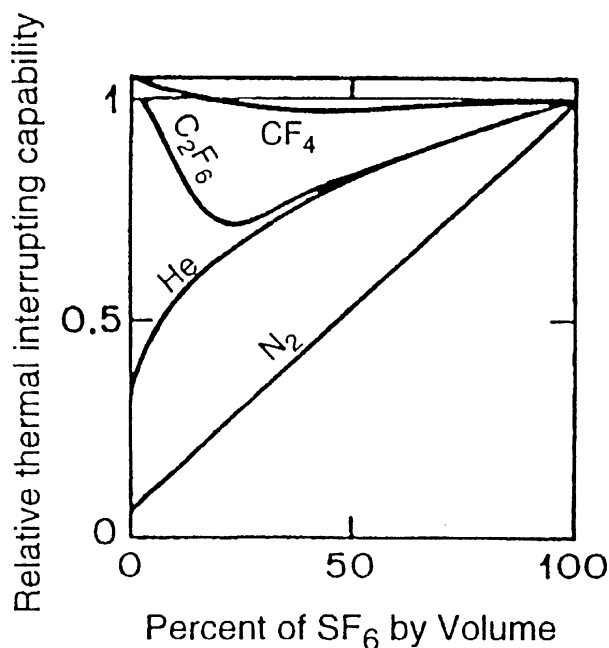
Gaz lub mieszanina gazowa	Z ₀ = 450 Ω	
	I _{wytl} [kA]	względna zdolność wyłączeniowa [%]
100%SF ₆	21,0	100
75%SF ₆ +25%N ₂	17,8	85
50%SF ₆ +50 %N ₂	14,9	71
75%SF ₆ +25%He	15,4	73
50%SF ₆ +50%He	14,7	70

Z danych tabeli 5 wynika, że zdolność wyłączeniowa mieszanin gazowych z N₂ lub He maleje nawet do 30%.

Dla łączników i rozdzielnic pracujących w temperaturach poniżej 40°C i ciśnieniu 0,7 MPa stosowane są przez firmę Siemens mieszaniny gazowe o składzie 60%SF₆ i 40%N₂.

W tym zakresie nie do końca jest wyjaśnione przejścia fazowe gaz-ciecz dla mieszaniny gazowej, jak również wpływ na to przejście pyłów, wilgoci, jonów, twardych cząstek i innych. Nie jest również dostatecznie zbadana sprawa parametrów elektrycznych i termicznych mieszaniny po dłuższym czasie eksploatacji w tym zwłaszcza dotyczących wytrzymałości dielektrycznej.

W ostatnich latach dla łączników pracujących przy niskich temperaturach (< -30°C) zastosowano mieszaniny gazowe SF₆ z CF₄ lub C₂F₆. Wyniki badań zdolności wyłączeniowej przy uwzględnieniu tylko zapłonów cieplnych (co dotyczy wyłączania dużych prądów wyłączeniowych) podano na rys. 6 [12]. Na rysunku tym podano dla porównania wyniki badań zdolności wyłączeniowej dla czystego azotu (N₂) i helu (He).



Rys. 6. Względna termiczna zdolność wyłączeniowa mieszanin gazowych SF₆-N₂ [12]

Z danych tych wynika, że stosunkowo korzystna jest dla gaszenia łuku mieszanina SF₆ z CF₄. Wprawdzie wytrzymałość dielektryczna CF₄ przy tym samym ciśnieniu jest mniejsza niż SF₆ to jednak zachowane są warunki wyłączeniowe przy możliwości pracy przy niższych temperaturach. I tak firma Alstom, stosując mieszaninę 50%SF₆ oraz 50%CF₄ dla wyłącznika dwuprzerwowego 525 kV, 40 kA przez zmianę ciśnienia z 0,64 MPa na 0,82 MPa zachowała parametry łączeniowe przy możliwości pracy w temperaturze do -40°C, zamiast do -30°C dla czystego SF₆. Zastosowanie mieszaniny SF₆-N₂ zmniejsza również zdolność wyłączania łuku; zwiększenie zdolności wyłączeniowej wymaga zatem wzrostu ciśnienia dla mieszaniny z czym związana jest sprawa utrudnień w utrzymaniu szczelności i większe obciążenia mechaniczne. Zmniejszenie ilości SF₆ prowadzi do mniejszego jego przenikania do atmosfery, a co zatem i zmniejszenie efektu cieplarnianego oraz ograniczenie wpływów biologicznych produktów jego rozkładu

Wnioski końcowe

Sześćciofluorek siarki jest gazem o bardzo dobrych własnościach dielektrycznych i cieplnych stąd też i o bardzo korzystnych cechach dotyczących gaszenia łuku, potwierdzonych wieloletnią eksploatacją różnych urządzeń elektroenergetycznych jak: łączniki, przekładniki, transformatory, szynoprzewody, czy rozdzielnic. Jego podstawową wadą jest jednak bardzo wysoki tzw. potencjał cieplny, z czym wiąże się ocieplenie atmosfery oraz dodatkowo pewne zagrożenie biologiczne związane z produktami rozkładu SF₆ pod wpływem wyładowań elektrycznych. Czynniki te doprowadziły do konieczności poszukiwania gazów zastępczych, mieszanin gazowych, lub rozwiązań konstrukcyjnych i eksploatacyjnych ograniczających emisję SF₆ do atmosfery.

Prowadzone od prawie dwudziestu lat badania nie doprowadziły do zsyntetyzowania gazu o podobnych do SF₆ własnościach fizycznych, stąd przyjęto następujące rozwiązania

- ograniczenie SF₆ w układach izolacyjnych nowych urządzeń elektroenergetycznych przez zastosowanie mieszanin gazowych, przy udziale masowym SF₆ do poniżej 15%, oraz użyciu jako drugiego gazu w mieszaninie czystego azotu N₂,
- poprawę szczelności i dalsze ograniczeniu przenikania tego gazu do atmosfery przez nieszczelności oraz jego magazynowanie przy przeglądach i wymianach celem ponownego wykorzystania (recykling),
- dalsze stosowanie w łącznikach i przedziałach wyłącznikowych rozdzielnic czystego SF₆,
- dla łączników pracujących w warunkach temperatur poniżej -30°C, stosowanie mieszanin gazowych np. z N₂ lub CF₄, oraz
- zalecenie dalszych badań głównie dotyczących mieszanin gazowych

LITERATURA

- [1] Materiały informacyjne firmy Solvay, Fluor and Derivative
- [2] Ciok Z., Ochrona środowiska w elektroenergetyce - rozdz. 8. PWN, Warszawa, 2001

- [3] Niemeyer L., Chu F.Y., SF₆ and the Atmosphere: *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, vol. 27, No.1. Feb. 1992
- [4] Publikacja 163 CIGRE WG 23.02; Guide for SF₆ Gas Mixtures, August 2000.
- [5] Crookson A. H., Pedersen B. O., Analysis of the High Voltage Breakdown Results for Mixtures of SF₆ with CO₂, N₂, and Air, *Third Int. Symposium on High Voltage Engineering*; Milan paper 31.10, 1979
- [6] Qiu Y., Feng Y.P., Investigation on SF₆/N₂, SF₆/CO₂ and SF₆/air as Substitutes for SF₆, *Int. Symposium on Electrical Insulation*, Montreal-Quebec, pp. 766-769, June, 1996.
- [7] EPRI, Gases Superior to SF₆ for Insulation and Interruption, *Report EPRI EI*, 2620, September 1982.
- [8] Cookson A., H., Wootton R. E., Particle Movement and Gas Breakdown in High Pressure Nitrogen and Sulphur Hexafluoride *Third Int. Conference on Gas Discharges*, London pp. 385-388, 1074.
- [9] Dale S. J., and oth., Effect of Particle Contamination in SF₆, *Gaseous Dielectrics II. New York Pergamon Press* pp. 256-265. 1980
- [10] Grant D.M., and oth., Comparative Interruption Studies of Gas Blasted Arcs in SF₆/N₂ and SF₆/He Mixtures. *Proc. 4th Int. Conference on Gas Discharges, IEE Conf. Publ.* No 143, pp 48-51, 1976
- [11] Garzon R., D., The Effects of SF₆/N₂ Mixtures upon The Recovery Voltage Capability of a Synchronous Interrupter. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-95 pp 140-144, 1976.
- [12] Middleton R., and oth., Development Work on for the Application of 245 kV Circuit Breaker Using SF₆/N₂ and SF₆/CF₄ Gas Mixtures on the Manitoba Hydro System, Canadian Electrical Association Canada March 1994
- [13] Cooke C. M., Velazquez R.: The Insulation in Large Coaxial System Using Compressed SF₆ Gas *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*. PAS-96 pp 1491 - 1497, 1977
- [14] Lee A., Frost L., S.: Interruption Capability of Gases and Gas Mixtures in a Puffer - type Interrupter, *IEEE Trans. on Plasma Science* vol. PS-8 pp 362 - 367, 1980.
- [15] Wootton R. E., Cookson A., H., AC Particle Initiated Breakdown in Compressed Gas Mixtures of SF₆ with He, N₂, and CO₂, *5th Int. Conference on Gas Discharges*, IEE Publ. No 165 pp. 177 - 180, 1978.

Autor: Prof. Zbigniew Ciok, Politechnika Warszawska, Warszawa
Plac Politechniki 1, E-mail: zbigniew.ciok@ien.pw.edu.pl